

# 小型波浪発電装置の開発

岩 永 正 裕\*・山 岸 陽 一\*

A Development of Portable Wave Power Converter

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

## Abstract

The purpose of this paper is to develop a portable wave power converter useful for seaside recreation. We chose the simplest type of wave power converter in construction, and it consisted of a float, a weight and pulley blocks. In this paper, we studied the possible conversion efficiency by model experiments.

We tried two types of methods to restrict the horizontal motion of the float. At first we used a vertical fixed pole on which the float slid, and we could not get enough efficiency. Next instead of a fixed pole, we use a vertical string with a weight at the bottom of it and made the float able to move horizontally more freely. Then we could get higher efficiency up to 56% because making it possible to use not only the potential energy but also the kinetic energy of wave by the horizontal motion.

## 1. は じ め に

手軽に持ち運びできて、海辺のレジャー等で使用できる波浪発電装置の開発を試みる。構造が簡単なつるべ式の波浪発電装置を取り上げ、波浪エネルギーの回収効率を調べる。本報告では波浪水槽を用いたモデル実験によって基礎データを収集し、実用実験装置の設計指針を得ることが目的である。

## 記 号

$a$ : プーリーの半径  
 $C_D$ : 抗力係数  
 $D$ : 浮きの直径  
 $f_1$ : 浮きを吊り下げる糸の張力  
 $f_2$ : おもりを吊り下げる糸の張力  
 $g$ : 重力加速度  
 $h$ : 浮きの片振幅  
 $h_0$ : 波の片振幅

$I$ : 同心2重円筒型粘度計の軸の慣性モーメント  
 $k_f$ : 浮力の補正のために導入した定数  
 $k_m$ : 付加質量係数  
 $L$ : 同心2重円筒型粘度計の油が入っている高さ  
 $l$ : 静止状態で浮きが水に沈んでいる深さ  
 $M$ : 浮きの質量  
 $m$ : おもりの質量  
 $Q$ : 同心2重円筒型粘度計のトルク  
 $R$ : 同心2重円筒型粘度計の内円柱の半径  
 $r$ : 油の半径方向の座標  
 $S$ : 浮きの底面積  
 $T$ : 波の周期  
 $v$ : 油の周方向速度成分  
 $v_i$ : 内円柱表面の周方向速度  
 $w$ : 同心2重円筒型粘度計によって消費される仕事率  
 $w_0$ : 単位幅あたりの波が持つ仕事率  
 $y$ : 釣合の位置を原点とした上向きの浮きの座標  
 $y_w$ : 波の表面上向きの座標

1992年9月28日受理

\* 機械工学科

$\delta$ : 同心2重円筒の隙間

$\xi$ : 同心2重円筒型粘度計による減衰率

$\eta$ : エネルギー回収効率  $\left(\frac{100w}{w_0 D}\right)$

$\mu$ : 油の粘度

$\nu$ : 油の動粘度

$\rho$ : 水の密度

$\tau$ : セン断応力

$\omega$ : 波の円振動数

$\omega_n$ : 固有円振動数

$\omega^*$ : 波の円振動数と固有円振動数の比  
( $=\omega/\omega_n$ )

## 2. 実験装置および方法

塩ビ製幅1 m, 高さ0.75 m(水深約0.5 m), 長さ4 mの水槽にプランジャー式造波装置を設置して片振幅約17~20 mm, 周期0.54 sの波を起こして実験を行った。Fig. 1に示すようなつるべ式の波浪発電装置を考える。浮きは直径65 mmのポリエチレン製円筒容器で容器内に水を入れて重さを変化させて(52~162 g)水槽に浮かせた。おもりの質量はおもりと浮きの質量比が

0.32~0.80の範囲で変化するように設定した。浮きは波によって水平方向に移動しないように金属製の丸棒の上を上下にスライドするようにした。エネルギー回収効率を知るために発電機の代わりに同心2重円筒型粘度計(外円筒内径25.4 mm, 内円柱直径22 mm, 内円柱の長さ200 mm)を製作し使用した。この粘度計の油の高さやブーリー径を変化させて実験を行った。浮きの変位ならびに波高の計測は電気抵抗式水位計を製作して使用した。

## 3. 実験結果の整理方法とシミュレーション

### 3.1 同心2重円筒型粘度計で消費される仕事率の見積り

本実験装置の場合, 発電に使用できる仕事率は同心2重円筒型粘度計で消費される仕事率であると考えられる。この同心2重円筒型粘度計は非定常な運動をしており, ここで消費される仕事率を見積るためには次のような2重円筒の隙間の油の運動方程式を解く必要がある。

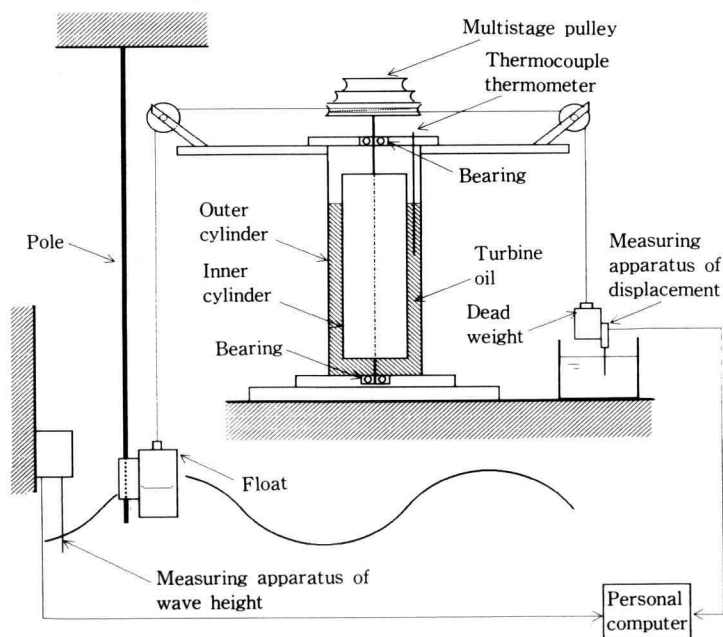


Fig. 1. Experimental apparatus.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right)$$

ここに  $v$  は油の周方向速度成分,  $r$  は半径方向の座標,  $\nu$  は油の動粘度である。境界条件は外円筒表面では静止しており, 内円柱表面では内円柱表面速度で回転運動をしている。内円柱はブーリーを通じておもりと浮きの運動が伝えられており, おもりの変位を実験で計測してあるので内円柱表面速度は既知である。そこで上式をこれらの境界条件のもとに前進差分法で数周期にわたって解いて, 最後の何周期かのせん断応力と速度変動をもとに次のようにして消費仕事率を見積った。せん断応力  $\tau$  は油の粘度を  $\mu$  として

$$\tau = \mu r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right)$$

で与えられるので, 単位時間あたりの消費仕事率の平均値  $w$  は

$$w = \frac{\int_0^{nT} \tau v_i (2\pi R L) dt}{nT}$$

となる。ここに  $T$  は波の周期,  $n$  は整数,  $R$  は内円柱の半径,  $v_i$  は内円柱表面の周方向速度である。

また単位幅あたりの波が持つ仕事率  $w_0$  は波高 (片振幅) を  $h$  として

$$w_0 = \frac{g^2}{4\pi} \rho h^2 T$$

で表される。

本報告では同心 2 重円筒型粘度計は発電機のためわりに用いられたものであり, エネルギー回収効率  $\eta$  を

$$\eta = \frac{100w}{w_0 D}$$

で定義する。ここに  $D$  は浮きの直径である。

### 3.2 シミュレーション

この系をコンピュータシミュレーションするために運動方程式をたてる。浮きの質量を  $M$ , 底面積を  $S$ , 釣合の位置を原点として上向きの座標を  $y$ , 波の表面の上向きの座標を  $y_w$ , 浮きの上下運動に関する抗力係数を  $C_D$ , 付加質量係数を  $k_m$ , 浮きを吊り下げる糸の張力を  $f_1$ , 重力加速度を  $g$  とすると, 浮きの運動方程式は次式となる。

$$(M + k_m \rho l S) \ddot{y} = f_1 \quad \text{糸の張力}$$

$$\begin{aligned} & -Mg && \text{重力} \\ & + k_f \cdot \rho (y_w - y + l) S g && \text{浮力} \\ & - C_D S \rho \dot{y} |\dot{y}| / 2 && \text{抗力} \quad \dots\dots\dots ① \end{aligned}$$

ここに  $l$  は浮きとおもりが釣り合っているとき浮きが沈む深さを表す。

$$\text{即ち } \rho g S l = (M - m) g.$$

$C_D$  と  $k_m$  の値は浮きだけを水面で上下に振動させてその減衰を調べることににより  $C_D = 6$ ,  $k_m = 0.3$  が適当であることを予め調べた。ただしこの抗力係数には造波抵抗による値も含まれる。 $k_f$  は浮きが水面より離れた場合の浮力の補正のために導入した定数で 1 である。上式は次の 2 つの条件を満足しなければならない。条件 a)  $y - y_w > l$  のとき浮きは水面から離れてしまうので  $C_D = 0$ ,  $k_r = 0$ ,  $k_m = 0$  となる。

条件 b) 糸の張力  $f_1$  は常に  $f_1 > 0$  の条件を満足する必要がある。

同心 2 重円筒型粘度計の軸の慣性モーメントを  $I$ , 粘性によるトルクを  $Q$ , ブーリーの半径を  $a$ , おもりを吊す糸の張力を  $f_2$  とすると, 同心 2 重円筒型粘度計の運動方程式は次式となる。

$$I \ddot{y} / a = (f_2 - f_1) a - Q \quad \dots\dots\dots ②$$

おもりの質量を  $m$  とするとおもりの運動方程式は次式となる。

$$m \ddot{y} = m g - f_2 \quad \dots\dots\dots ③$$

上式は次の条件を満足する必要がある。

条件 c) 糸の張力  $f_2$  は常に  $f_2 > 0$  の条件を満足する必要がある。

これらをまとめると次式となる。

$$\begin{aligned} & (M + m + I/a^2 + k_m \rho l S) \ddot{y} \\ & = \rho \{ k_f (y_w - y) + (k_f - 1) l \} S g \quad \text{浮力, 重力} \\ & - C_D S \rho \dot{y} |\dot{y}| / 2 \quad \text{抗力} \\ & - Q/a \quad \text{粘性によるトルク} \quad \dots\dots\dots ④ \end{aligned}$$

さて粘性によるトルク  $Q$  は同心 2 重円筒型粘度計の油が入っている高さを  $L$ , 同心 2 重円筒の隙間を  $\delta$  とすると次式で与えられる。

$$Q = \frac{2\pi\mu R^3 L}{\delta a} \dot{y} \quad \dots\dots\dots ⑤$$

上式は定常状態の式であり, 本来は 3.1 のように同心 2 重円筒の隙間の油の非定常的な運動を計算して求めるべきであるが, 試算したところ式 ⑤ で見積る場合と

10% 程度しか変わらないのでシミュレーションの計算には簡単のため式⑤を用いることとした。

以下にシミュレーションの流れを示す。

- (1)  $y = \dot{y} = 0$  として計算を始める。
- (2) 実験結果の  $y_w$  をもとに式④, ⑤を用いて加速度  $\ddot{y}$  を求める。
- (3) 加速度  $\ddot{y}$  から速度  $\dot{y}$ , 位置  $y$  を求める。
- (4) (2)に戻って波の数周期にわたって繰り返し計算を行うが, 条件 a を常に調べて  $C_D, k_f, k_m$  を決定し, 浮きが水面から離れている時間割合と, 条件 b, c を満足しない時間割合を調べておく。

またこの系の固有円振動数  $\omega_n$  は

$$\omega_n = \sqrt{\rho g S / (M + m + I/a^2 + k_m \rho I S)}$$

であり, 波の円振動数  $\omega$  と  $\omega_n$  の比  $\omega^*$  を用いて実験結果を整理する。

同心 2 重円筒型粘度計による減衰率  $\zeta$  は次式で定義される。

$$\zeta = \frac{\pi \mu R^3 L}{\omega_n (M + m + I/a^2 + k_m \rho I S) \delta a^2}$$

#### 4. 実験結果

Fig. 2 は縦軸に浮きの片振幅と波の片振幅の比  $h/h_0$  を, 横軸に  $\omega^*$  を取って実験結果を整理したものであり, ほぼ一本の曲線に整理できることがわかる。

Fig. 3 はシミュレーション結果を Fig. 2 と同様のグラフに表したもので, 浮きが水面から離れた (条件 a となる) 時間割合で記号分けしてある。シミュレーショ

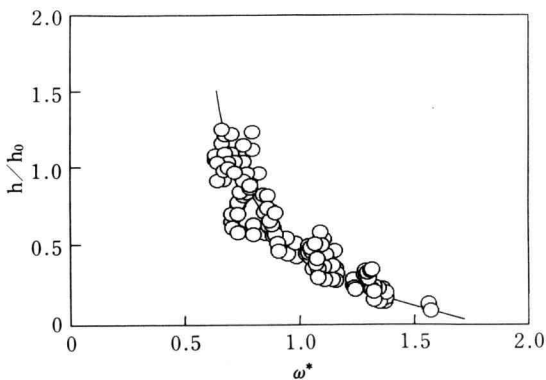


Fig. 2. Magnification factor and frequency ratio obtained by experiment.

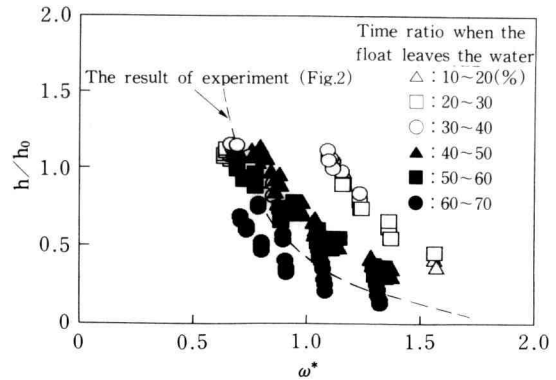


Fig. 3. Magnification factor and frequency ratio obtained by computer simulation.

ン結果の方がばらつきが多いが傾向は Fig. 2 とよく一致することがわかる。

Fig. 4 は縦軸にエネルギー回収効率  $\eta$  を, 横軸に  $\omega^*$  を取って実験結果を示したものであり, 最大 40% の効率が得られた。

Fig. 5 は縦軸にエネルギー回収効率  $\eta$  を, 横軸に  $\zeta$  を取って実験結果を示したものであり,  $\omega^*$  によって記号分けしてある。振幅が  $\omega^*$  によってほぼ決まるので,  $\omega^*$  が一定のとき  $\zeta$  が大きいほどエネルギー回収効率 (消費仕事率) が大きいことを表している。

次に浮きの運動を制限するために使用した丸棒のかわりにおもりを付けた糸を使用して水平方向の運動も多少の自由度を持たせるように変更した。

Fig. 6 は Fig. 2 と同様な図であり, Fig. 6 の方が Fig. 2 よりも多少振幅比が大きくなっているが, グラ

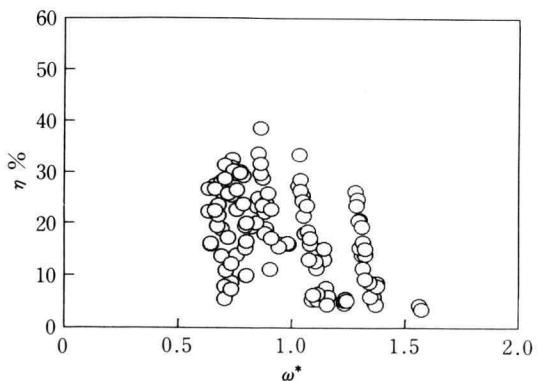


Fig. 4. Conversion efficiency and frequency factor obtained by experiment.

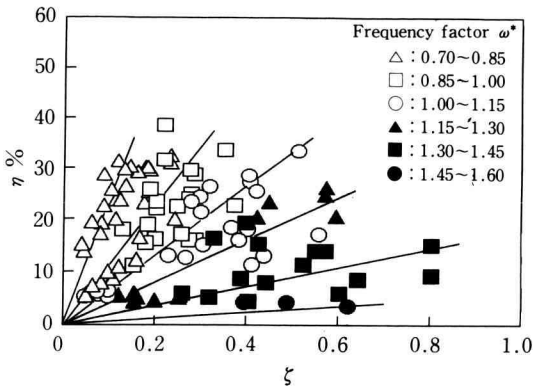


Fig. 5. Conversion efficiency and damping factor obtained by experiment.

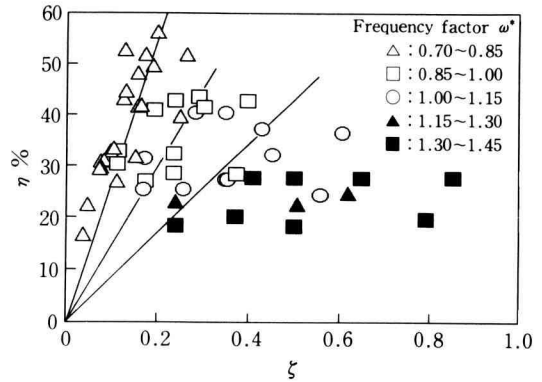


Fig. 7. Conversion efficiency and damping factor obtained by using a string as the guide of float.

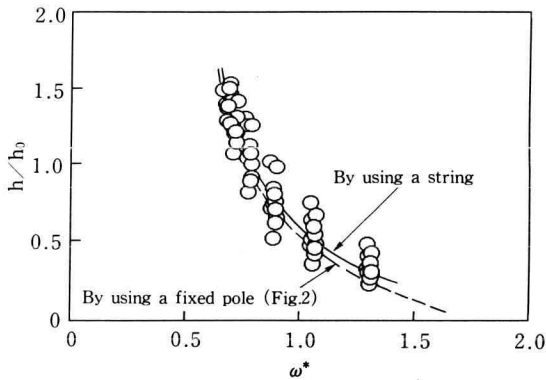


Fig. 6. Magnification factor and frequency ratio obtained by using a string as the guide of float.

フの傾向はほとんど変わらないことがわかった。

Fig. 7 は Fig. 5 と同様な図であり、50% 以上の発電効率が得られる可能性を示している。

以上のことより、浮きの保持方法は上下の運動だけに固定するよりは水平方向にも多少の自由度を持たせる方が波の持つ運動エネルギーも利用できるようなものと考えられる。また波の上の流体粒子は波高を半径とする円上を運動することから、水平方向に多少の自由度を持たせる方が摩擦損失が減ることも予想で

きる。しかし水平方向にどの程度の自由度をもたせ、どのような拘束方法を用いると発電効率が最大となるかは今後の課題である。

## 5. む す び

非常に単純な構造のつるべ式波浪発電装置についてその性能を波浪水槽による実験ならびにコンピュータシミュレーションで調べた。その結果上下方向だけに運動を制限すると十分なエネルギー変換ができないことがわかり、水平方向に多少の自由度を持たせる方が波の持つ位置エネルギーのみならず運動エネルギーも利用できるようになり、波浪発電に利用できるエネルギーが増すことがわかった。本研究で現在までに得られた最大回収効率は約 56% であった。

## 6. 謝 辞

本研究は 4 年次卒業研究として行われたものであり、下記の諸君の協力を得たことを記して謝意を表する。

高橋 武久, 長村 佳明  
蒲山 智昭, 渋谷 高明, 永堀由紀夫